

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.02.010

“双碳”背景下光伏建筑一体化发展影响因素分析

孙瑞鸿, 周盛世, 李 龙

(青岛理工大学 管理工程学院, 山东 青岛 266520)

摘 要: 光伏建筑一体化技术研究多从政策法规和技术层面讨论其应用前景与发展趋势, 鲜有来自政策、管理、经济等多角度影响因素的多层次关联性研究。为了探索光伏建筑一体化发展的影响因素以及因素间的相互关系, 结合专家讨论法和文献阅读, 利用解释结构模型建立了层级结构图, 并利用层次分析法计算各指标的权重, 经过一致性检验得知: 政策激励程度、规范标准的完善程度、法律法规的健全程度为影响光伏建筑一体化发展的深层因素; 光伏技术的发展程度、行业融资风险、利益相关者利益分配模式等为中间层因素; 建设单位开发积极性为表层因素, 3层因素相互关联, 不同程度地影响着光伏建筑一体化发展。建议从完善相关法律与监管系统、建立科学高效的管理模式、提升消费者与开发者对该技术的接纳程度等方面着手, 以促进该技术的发展。

关键词: 光伏建筑一体化 (BIPV); 解释结构模型 (ISM); 影响因素; 层次分析法

中图分类号: TU18; TU761.1⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2023)02-0065-07

引文格式: 孙瑞鸿, 周盛世, 李 龙. “双碳”背景下光伏建筑一体化发展影响因素分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(2): 65-71.

Analysis of the Influencing Factors on BIPV Development Under the “Dual-Carbon” Background

SUN Ruihong, ZHOU Shengshi, LI Long

(School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong 266520, China)

Abstract: The current research on photovoltaic building integrated technology is mainly focused on its application prospect and development trend from the perspective of policies, regulations and technology, while rarely on the multi-level correlation inquiry from governmental policy, management, economy and other influencing factors. In view of an inquiry into the influencing factors on BIPV development and the interrelationship between them, combined with the expert discussion method and literature reading, a hierarchical structure chart has thus been established by adopting the interpretive structure model, with the weight of each index calculated using the analytic hierarchy process. On the basis of a consistency test, it is learned that the degree of policy incentive, the degree of norms and standards, and the perfect degree of laws and regulations are the deep factors affecting the integrated development of photovoltaic buildings; the development degree of photovoltaic technology, the industry financing risk, and the stakeholder benefit distribution mode are the intermediate factors, while the development enthusiasm of the construction unit is the surface factor. The three layers of factors are interrelated, affecting the integrated development of photovoltaic buildings in varying degrees. It is suggested that the relevant legal and regulatory system should be improved, a scientific and efficient management

收稿日期: 2022-06-20

作者简介: 孙瑞鸿 (1997-), 男, 山东枣庄人, 青岛理工大学硕士生, 主要研究方向为工程项目管理, 绿色建筑,
E-mail: sdzzshn@163.com

通信作者: 周盛世 (1964-), 男, 浙江浦江人, 青岛理工大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为物流与供应链, 工程项目管理, E-mail: zsszj@126.com

model should be established, and the willingness of consumers and developers should be enhanced for the acceptance of the proposed technology, so as to promote the development of this technology.

Keywords: BIPV; ISM; influencing factor; analytic hierarchy process (AHP)

0 引言

光伏建筑一体化 (building integrated photovoltaic, BIPV) 是一种将光能融入建筑设计中的新型绿色建筑技术。作为光伏开发的一大模式, BIPV 具有高收益、靠近用户侧、灵活性强等优势, 投资价值正被重新评估和探讨。光伏建筑一体化在节能减碳、提升建筑美学等方面有突出优势, 且高度契合双碳目标, 符合全球绿色发展趋势。《2013—2017 年中国光伏建筑一体化行业市场前瞻与投资战略规划分析报告》中显示, 太阳能发电是现今科学技术的前沿阵地, 各地政府均支持太阳能发电事业。吉林、广东等 14 个省市明确发布了光伏建筑一体化相关补贴政策, 补贴力度为 0.3~0.4 元 / (kW·h), 补助限额为 (100~300) 万元。鉴于我国庞大的建筑市场和潜力巨大的光伏市场, 光伏建筑一体化的发展前景广阔。

对于光伏建筑一体化技术, 学者们开展了不同角度的研究。一部分学者以政策法规和标准规范为切入点进行研究, 如秦文军等^[1]对我国光伏建筑一体化的应用形式、行业发展前景及国家相关的政策法规进行梳理后, 指出系统规范的技术路线与良好的鼓励政策是推动该技术发展的重要因素; 周文波^[2]指出光伏建筑一体化是实现建筑碳中和的重要途径, 拥有完善的政策法规、技术标准和认证制度可以为推广该技术提供源源不断的创新能力; 彭寿^[3]对国内光伏建筑一体化政策法规进行解读, 认为目前相关法规只是倡导性、鼓励性的支持, 在材料、设计、施工、建筑等诸多方面的标准与规范仍不健全, 而全面具体的法规政策对光伏建筑一体化的发展至关重要。另一部分学者从技术层面做了研究, 如吴高翔等^[4]提出光伏产业同行间竞争激烈, 光伏组件生产企业需要不断改进生产技术, 减少组件质量问题, 提高成品率, 以促进光伏建筑一体化技术在我国的发展; 海涛等^[5]提出了将 BIM (building information modeling) 技术与光伏建筑一体化相结合的理念, 信息化技术的应用可以解决光伏建筑一体化建筑设计方案中信息交互困难及无法实现资源共享等问题。

综上, 学者们对于光伏建筑一体化发展的研究多为政策法规和技术对光伏建筑一体化发展的影响, 鲜

有来自政策、管理、经济等多角度影响因素的多层次关联性研究。基于此, 本研究拟采用模型优化的方式, 将解释结构模型 (interpretative structural modeling method, ISM) 与层次分析法相结合, 从政策型、管理型、技术型、经济型和社会型 5 种类型中识别出 18 个影响因素, 并利用解释结构模型分析光伏建筑一体化发展影响因素之间的关系, 结合层次分析法计算各指标权重, 明确因素间的相互作用关系和各因素的重要性程度, 以期提出适合光伏建筑一体化发展的相应对策与建议。

1 光伏建筑一体化优势及必要性分析

相较传统建筑模式, 光伏建筑一体化在施工工艺、节能减排等方面具有突出优势 (见表 1)。

表 1 光伏建筑一体化优势与必要性

Table 1 Advantages and necessity of BIPV technology

分类	优势	必要性
施工工艺	节省高耗能建筑材料, 降低成本	有利于国家推行建筑行业改革, 促进建筑行业的降本增效
节能减排	较低碳排放	是一种节能减排新形式, 充分利用可再生能源, 对于国家双碳目标的实现有很大作用, 且能提升供电效率
区域供电	产生电能, 并网供电	我国区域能源危机频发, 对于缓解区域供电压力提供重要支持

1) 节省高能耗建筑材料。光伏建筑一体化较附着在建筑物上的太阳能光伏发电技术有很大差异, 光伏建筑一体化是光伏方阵与建筑的集成, 光伏组件不仅满足了光伏发电的功能要求又构成了建筑主体的一部分。其将光伏组件与幕墙、屋顶相结合, 在节省建筑材料的基础上保证了建筑的基本功能应用, 节省了砌块、混凝土等在生产过程中高能耗、高污染建筑材料的使用。

2) 实现建筑自身产能, 减少能源损耗。传统建筑结构对于电能的需求依赖城市电网系统供电, 远距离供电会产生大量电能损耗, 降低供电效率。光伏建筑一体化技术利用建筑自身光伏组件将太阳能转化为电能, 缩短了供电路径, 有效减少了电网系统供电

过程中的损耗,提升供电效率。

3) 缓解区域供电压力,增加经济效益。以“光伏小镇”项目为例,“光伏小镇”项目是一种利用光伏建筑群实现产能并网发电的新型清洁能源发电项目,其既能保证居住的基本需求,又能缓解区域供电压力,同时给居民带来一定经济收入。现今,“光伏小镇”已经成为国家开发区域经济的手段之一,也是缓解国家电网供电系统压力的方法之一。

2 光伏建筑一体化发展影响因素识别

通过阅读相关文献^[6-10],对目前光伏建筑一体化发展影响因素进行搜索,发现影响光伏建筑一体化发展的因素涉及诸多方面。结合文献检索结果与专家访谈建议,最终选取政策、管理、技术、经济、社会等5种类型一级指标及下辖的18个二级因素指标,具体见表2。

表2 光伏建筑一体化发展影响因素指标体系

Table 2 Index system of influencing factors on BIPV development

一级指标	二级指标
政策型指标	政策激励程度、BIPV宣传推广力度、法律法规的健全程度、规范标准完善程度
管理型指标	建筑与光伏行业合作模式、BIPV项目运营机制、实践经验和水平、利益相关者利益分配模式
技术型指标	光伏技术发展程度、BIPV施工工艺进步速度、施工技术人员专业性、信息化技术的应用程度
经济型指标	光伏建材市场价格、行业融资风险、BIPV经济效益、BIPV增量成本
社会型指标	消费者接纳程度、建设单位开发积极性

1) 政策型指标。政策型指标一般为政府颁布的相关法律及标准,对新兴产业有规范和管制作用,产业的发展与其对社会的影响程度及相关支持政策息息相关。近年来,基于双碳背景出台的各种优惠政策,仅是倡导性、鼓励性的支持,但缺乏材料、设计、施工、建筑等诸多方面的标准与规范。

2) 管理型指标。企业在行业发展中扮演着实际管理者的角色,以盈利为目的采取管理手段。我国光伏建筑一体化推行时间较短,相关企业还没有形成系统的运营机制、合作模式、利益分配模式,建立完整有效的管理体系,是企业的工作重点。

3) 技术型指标。行业的进步离不开相关工艺技术的进步。随着“双碳目标”的提出,光伏建筑一体化这种新型绿色建筑技术也得到了发展,但依旧受到各种相关技术的制约,光伏建筑一体化技术具有特殊的施工工艺,需要施工人员有一定的专业水平,同时光伏、信息化技术也影响着这项技术的推广与发展。

4) 经济型指标。行业的发展有诸多利益相关者,利益相关者以低成本、低风险、高收益为关注点。由于光伏建筑一体化在国内发展时间较短,光伏建材供应链未成熟且市场需求量较小,导致光伏建筑一体化开发成本偏高,而在实施中所表现的环境生态效益短时间内无法呈现,诸多问题影响着开发商投资光伏建筑一体化项目的意愿。

5) 社会型指标。社会型指标更多指影响市场供需关系的因素。在现今市场环境下光伏建筑一体化的实施成本普遍高于传统建筑模式,消费者对传统建筑的消费意愿更高。消费者对实现房建项目光伏建筑一体化接纳程度较低,也制约着此项技术的推行。

3 解释结构模型建立

解释结构模型是一种现代系统工程的方法,通过建立系统要素之间的层级结构,分析要素间的关联、制约关系。解释结构模型的建立,表示系统要素间的关系结构矩阵,研究因素之间的影响路径与层级关系,实现非独立性影响因素关联与传递性研究的目的^[11]。该模型以定性分析为主,把模糊的系统要素转变为有良好层级关系的模型,适用分析关系复杂、因素众多且结构模糊的系统^[12]。

3.1 建立关联矩阵

将上文得到的5种类型18项影响因素构成集合 M , $M=\{M_i|i=1,2,\dots,18\}$,式中: M_1 为政策激励程度, M_2 为BIPV宣传推广力度, M_3 为法律法规的健全程度, M_4 为规范标准完善程度, M_5 为建筑与光伏行业合作模式, M_6 为BIPV项目运营机制, M_7 为实践经验和水平, M_8 为利益相关者利益分配模式, M_9 为光伏技术发展程度, M_{10} 为BIPV施工工艺进步速度, M_{11} 为施工技术人员专业性, M_{12} 为信息化技术的应用程度, M_{13} 为光伏建材市场价格, M_{14} 为行业融资风险, M_{15} 为BIPV经济效益, M_{16} 为BIPV增量成本, M_{17} 为消费者接纳程度, M_{18} 为建设单位开发积极性。

在利用解释结构模型分析方法之前,先要确定各影响因素间的相互联系,建立关联矩阵,以便明确各因素间的相互关系。为了清晰展示因素间关系,利用O、X、Y、Z来表示:O表示 M_i (行因素)与 M_j (列因素)之间互不影响;X表示 M_i (行因素)对 M_j (列因素)有影响;Y表示 M_j (列因素)对 M_i (行因素)有影响,Z表示 M_i (行因素)与 M_j (列因素)相互影响。

为了客观地建立关联矩阵,邀请12位专家成立研讨组,结合专家的经验和光伏建筑一体化发展的实际情况,对18个影响因素的相互关系进行讨论,得出一致结论,建立如表3所示关联矩阵^[13]。

表 3 光伏建筑一体化发展影响因素关联矩阵

Table 3 Correlation matrix of the influencing factors on BIPV development

	M_{18}	M_{17}	M_{16}	M_{15}	M_{14}	M_{13}	M_{12}	M_{11}	M_{10}	M_9	M_8	M_7	M_6	M_5	M_4	M_3	M_2	M_1
M_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	X	-
M_2	X	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	-
M_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	X	Z	-	-	-
M_4	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	-	-
M_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Y	X	0	X	-	-	-	-	-
M_6	0	X	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-
M_7	0	X	0	0	X	0	Y	Y	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
M_8	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
M_9	0	0	0	0	0	X	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{10}	0	0	0	0	0	0	0	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{11}	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{12}	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{13}	0	0	X	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{14}	X	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{15}	X	0	Y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{16}	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{17}	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{18}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2 建立邻接矩阵

将光伏建筑一体化发展影响因素当做一个完整系统，系统中各因素相互联系、相互制约， M_i 为行， M_j 为列，当 M_i 对 M_j 有影响时， $m_{ij}=1$ ；当 M_i 对 M_j 无影响时， $m_{ij}=0$ 。即：

$$m_{ij} = \begin{cases} 1, & M_i \text{ 对 } M_j \text{ 有影响;} \\ 0, & M_i \text{ 对 } M_j \text{ 无影响。} \end{cases} (i, j=1, 2, \dots, 18)。$$

根据光伏建筑一体化发展影响因素关联矩阵，确定了各因素之间的相互影响关系，得到 18×18 的邻接矩阵 M ，如表4所示。

表 4 光伏建筑一体化发展影响因素邻接矩阵 M Table 4 Adjacency matrix M of the affecting factors on BIPV development

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}	M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{14}	M_{15}	M_{16}	M_{17}	M_{18}
M_1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
M_3	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_4	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_5	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
M_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
M_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
M_9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
M_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
M_{11}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_{12}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
M_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
M_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
M_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
M_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
M_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.3 计算可达矩阵

可达矩阵 R 是描述有向连接图节点之间经过一定长度的路径后所能达到的程度，即利用矩阵的形式表达一种因素是否存在某种路径可以到达另一种因素^[14]。将单位矩阵 I 与邻接矩阵 M 相加得 $(M+I)$ ，利用Matlab软件对 $(M+I)$ 进行布尔运算，当存在 k 为某一值时，满足

$$(M+I)^{k+1} = (M+I)^k \neq (M+I)^{k-1},$$

此时得到如表5所示的可达矩阵 R ，

$$R = (M+I)^{k+1} = (M+I)^k。$$

表 5 光伏建筑一体化发展影响因素可达矩阵 R Table 5 Reachability matrix R of the affecting factors on BIPV development

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}	M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{14}	M_{15}	M_{16}	M_{17}	M_{18}
M_1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
M_2	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
M_3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
M_4	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M_5	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
M_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
M_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
M_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
M_9	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
M_{10}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1
M_{11}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1
M_{12}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
M_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1
M_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
M_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
M_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
M_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
M_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.4 建立层级模型

为了分析18个影响因素之间的相互关系，对可达矩阵 R 进行分解，将18个影响因素进行层级划分（见表6）。可达矩阵中的可达集 $R(M_i)$ 为 M_i 影响因素所在行中出现“1”所处列的集合，先行集 $Q(M_i)$ 为 M_i 影响因素所在列中出现“1”所处行的集合， $C(M_i)$ 表示可达集 $R(M_i)$ 与先行集 $Q(M_i)$ 的交集。当可达集 $R(M_i)$ 与先行集 $Q(M_i)$ 的交集 $C(M_i)$ 与可达集 $R(M_i)$ 相同时，所处 M_i 即为这一层级要素，然后将 M_i 所处行与列排除，逐级重复相同步骤寻找，直至到达最深层级^[15]。

经过计算，得到表7所示光伏建筑一体化发展影响因素层级划分结果，其中一级要素集合 $L_1=\{M_{18}\}$ ，二级要素集合 $L_2=\{M_{14}, M_{15}, M_{17}\}$ ，三级要素集合 $L_3=\{M_6, M_7, M_8, M_{16}\}$ ，四级要素集合 $L_4=\{M_5, M_{11}, M_{12}, M_{13}\}$ ，五级要素集合 $L_5=\{M_2, M_9, M_{10}\}$ ，六级要素集合 $L_6=\{M_1, M_3, M_4\}$ 。

表6 光伏建筑一体化发展影响因素层级分析

Table 6 Level analysis of the influencing factors on BIPV development

因素	$R(M_i)$	$Q(M_i)$	$C(M_i)$
M_1	1, 2, 5, 6, 8, 9, 13-18	1	1
M_2	2, 5, 6, 8, 13-18	1, 2	2
M_3	3-11, 13-18	3, 4	3, 4
M_4	3-11, 13-18	3, 4	3, 4
M_5	5, 6, 8, 14, 15, 17, 18	1-5, 9	5
M_6	6, 14, 15, 17, 18	1-6, 9	6
M_7	7, 14, 17, 18	3, 4, 7, 10, 11, 12	7
M_8	8, 14, 18	1-5, 8, 9	8
M_9	5, 6, 8, 9, 13-18	1-4, 9	9
M_{10}	7, 10, 11, 14, 17, 18	3, 4, 10	10
M_{11}	7, 11, 14, 17, 18	3, 4, 10, 11	11
M_{12}	7, 12, 14, 17, 18	12	12
M_{13}	13, 15, 16, 18	1-4, 9, 13	13
M_{14}	14, 18	1-12, 14	14
M_{15}	15, 18	1-6, 9, 13, 15, 16	15
M_{16}	15, 16, 18	1-4, 9, 13, 16	16
M_{17}	17, 18	1-7, 9-12, 17	17
M_{18}	18	1-18	18

表7 光伏建筑一体化发展影响因素层级划分

Table 7 Classification of the influencing factors on BIPV development

层级	要素	层级	要素
L_1 层	M_{18}	L_4 层	$M_5, M_{11}, M_{12}, M_{13}$
L_2 层	M_{14}, M_{15}, M_{17}	L_5 层	M_2, M_9, M_{10}
L_3 层	M_6, M_7, M_8, M_{16}	L_6 层	M_1, M_3, M_4

3.5 建立光伏建筑一体化发展影响因素 ISM 模型

根据层级划分结果,建立光伏建筑一体化发展影响因素 ISM 模型,如图 1 所示。

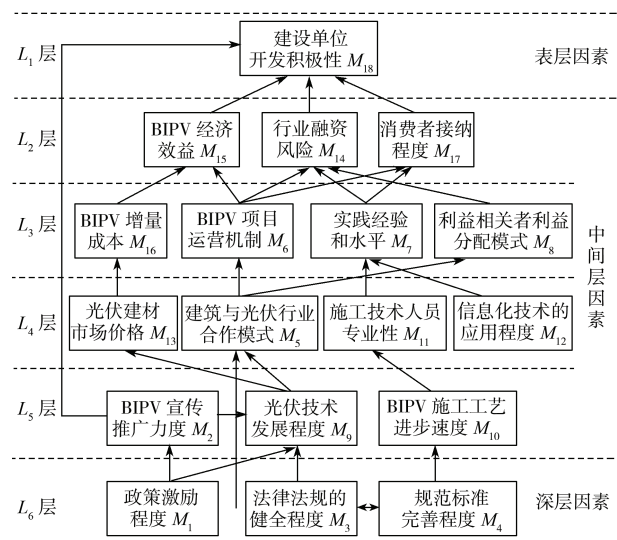


图1 光伏建筑一体化发展影响因素 ISM 模型

Fig. 1 ISM model of the influencing factors on BIPV development

通过建立光伏建筑一体化 ISM 模型,对发展影响因素进行分层处理,分为表层、中间层及深层因素。

表层因素包括 M_{18} 建设单位开发积极性,建设单位开发积极性会直接影响光伏建筑一体化的发展,受到更深层次的制约。中间层因素包括 M_2 BIPV 宣传推广力度、 M_9 光伏技术发展程度、 M_{10} BIPV 施工工艺进步速度、 M_{13} 光伏建材市场价格、 M_5 建筑与光伏行业合作模式、 M_{11} 施工技术人员专业性、 M_{12} 信息化技术的应用程度、 M_{16} BIPV 增量成本、 M_6 BIPV 项目运营机制、 M_7 实践经验和水平、 M_8 利益相关者利益分配模式、 M_{15} BIPV 经济效益、 M_{14} 行业融资风险、 M_{17} 消费者接纳程度,这些因素通过影响表层因素,会间接影响光伏建筑一体化的发展,同时受深层因素的约束。最底层为深层因素,包括 M_1 政策激励程度、 M_3 法律法规的健全程度、 M_4 规范标准完善程度,这些因素是影响光伏建筑一体化发展的根本因素。

3.6 AHP 方法分析

解释结构模型仅对影响因素间纵向关系做了定性分析,缺乏定量数据的支持。而层次分析法对影响因素之间横向关系做定量描述,分析各影响因素权重,根据光伏建筑一体化发展影响因素识别结果建立如图 2 所示的层次结构模型。

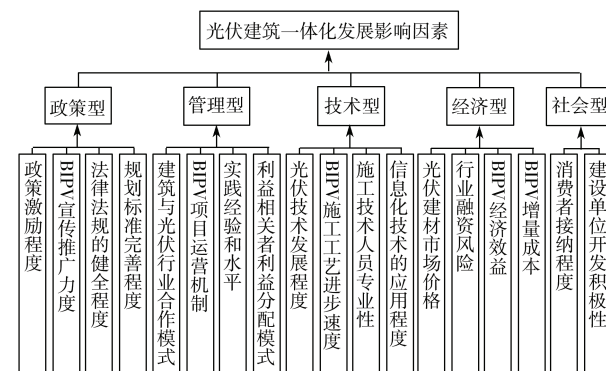


图2 光伏建筑一体化发展影响因素层次结构模型

Fig. 2 Hierarchical structure model of the factors influencing BIPV development

根据 1~9 标度法和专家打分法对指标体系进行打分,构造如表 8 所示的判断矩阵。

表8 光伏建筑一体化发展的影响因素判断矩阵

Table 8 Judgment matrix of the influencing factors on BIPV development

指标	政策型 指标	管理型 指标	技术型 指标	经济型 指标	社会型 指标
政策型指标	1	2	4	4	7
管理型指标	1/2	1	1	1/2	5
技术型指标	1/4	1	1	2	5
经济型指标	1/4	2	1/2	1	5
社会型指标	1/7	1/5	1/5	1/5	1

利用 yaahp 软件对影响因素权重进行计算,结果见表 9。经验证,均符合一致性要求。

表 9 光伏建筑一体化发展影响因素各指标权重
Table 9 Index weight of the factors influencing factors on BIPV development

一级指标	权重	排序	二级指标	权重	排序
政策型指标	0.455 9	1	政策激励程度	0.154 2	1
			BIPV 宣传推广力度	0.027 6	12
			法律法规的健全程度	0.133 6	3
			规范标准完善程度	0.140 5	2
管理型指标	0.158 1	4	建筑与光伏行业合作模式	0.034 4	10
			BIPV 项目运营机制	0.050 2	8
			实践经验和水平	0.013 1	18
			利益相关者利益分配模式	0.060 4	6
技术型指标	0.183 0	2	光伏技术发展程度	0.089 6	4
			BIPV 施工工艺进步速度	0.043 3	9
			施工技术人员专业性	0.018 5	16
			信息化技术的应用程度	0.031 7	11
经济型指标	0.164 6	3	光伏建材市场价格	0.013 6	17
			行业融资风险	0.067 5	5
			BIPV 经济效益	0.057 6	7
			BIPV 增量成本	0.026 0	13
社会型指标	0.038 4	5	消费者接纳程度	0.019 2	14
			建设单位开发积极性	0.019 2	15

据表 9 中数值，通过排序可得一级指标中政策型和技术型指标对于我国发展光伏建筑一体化影响显著，二级指标中政策激励程度、规范标准完善程度、法律法规的健全程度所占权重较大，贡献较大。

4 结果分析

1) 深层因素。解释结构模型中，深层因素与层次分析影响因子权重排序中前三名基本一致，均是政策型指标，政策激励程度、规范标准完善程度、法律法规的健全程度三要素，既有着极高的权重又作为最深层次的影响因素主导着光伏建筑一体化的发展，贡献度极高，是技术发展的基本要素。政府可以通过税收减免、财政补贴、人才优惠等政策来刺激相关企业和人才对信息化及其他专业技术的追求。政策和制度体系的建成，从根本上决定了此技术的发展前景，良好的政策对推动技术发展有极大动力。

2) 中间层因素。中间层因素较为综合，包括光伏技术发展程度、行业融资风险、利益相关者利益分配模式等指标，结合影响因素权重排序，与权重中间排序基本重合，其中光伏技术的发展程度、行业融资风险、利益相关者利益分配模式 3 种指标的贡献度较高，虽然未直接影响光伏建筑一体化发展，但通过影响表层因素对其发展也有着举足轻重的作用。

3) 表层因素。表层因素为建设单位开发积极性，通过更深层次影响因素的传递作用直接影响着行业的发展。建设单位开发积极性在一定程度上也反映了

光伏建筑一体化的应用合理性、收益性和市场接受性，通过表层因素的直观展现，提升政府和民众对推行这种新型绿色建筑技术的信心。如何提高建设单位开发积极性，依赖于深层因素与中间层因素的解决。

5 对策与建议

1) 完善相关法律与监管系统，加大该技术推广力度。政府通过完善法律法规来保证光伏建筑一体化技术的健康持续发展，同时给予充足的激励政策，例如环保专项补贴、税赋减免、容积率补贴、人才补贴等政策，吸引资本市场和人才的关注，国家资本带头发展，鼓励民营企业投资，做好“双碳目标”推广，增强消费者对环保产业的信心，同时提高民众认可度。鼓励科研院所、高校和企业开展光伏建筑一体化专项研究工作，以保证技术高精尖发展。

2) 建立科学高效的管理模式。目前，建筑行业对于实现光伏建筑一体化的项目，过分依靠传统管理模式，缺乏创新意识，企业需转变组织管理模式，深入开发专用管理体系，进一步完善产业发展规划，形成集运营机制、收益分配模式、合作机制于一体的多元化管理体系。政府也需开发适用于新型建造方式的管理模式，鼓励企业改革创新。

3) 提升消费者与开发者对该技术的接纳程度。低碳环保的同时，可产生直接效益，如并网发电、碳交易市场等。光伏建筑一体化是一种新型绿色建筑技术，要想实现良好的发展前景，就要从根本上改变民众对于“环保≠收益”的惯性思维，加大宣传力度，提高 BIPV 消费者接纳程度，扩大消费群体，提升建设单位开发应用光伏建筑一体化技术的积极性。

4) 推动系统内部降本增效，发展相关产业和技术。加强系统内部管理，把握高产能、高效率的生产方式，精简工艺流程，寻求性价比更高的替代材料。推动光伏产业的发展，在光伏组件、光伏幕墙、光伏瓦等光伏建材生产项目中给予支持政策，完善原材料供应链，从产业化的角度，贯穿生产、运输、安装、竣工验收全过程，增强项目实施衔接度。大力推行试点项目，推进系统管理培训，建立完善的系统化产业。

5) 推进信息化技术在光伏建筑一体化领域的应用。随着以建筑信息化模型（BIM）为代表的信息化技术在建筑行业的广泛应用，信息化技术已经成为建筑产业发展的核心应用技术。政府应鼓励新开项目创新应用信息化技术，倡导学者建立产业信息化应用研究课题，结合光伏建筑一体化特点实现产业信息化的系统完整性。

参考文献:

- [1] 秦文军, 李 想. 中国光伏建筑一体化行业概况与发展前景[J]. 建筑学报, 2019(增刊2): 6-9.
QIN Wenjun, LI Xiang. China BIPV Industry Overview and Development Prospect[J]. Architectural Journal, 2019(S2): 6-9.
- [2] 周文波. 碳中和背景下的光伏建筑一体化发展趋势[J]. 现代雷达, 2021, 43(7): 98-99.
ZHOU Wenbo. Development Trend of Photovoltaic Building Integration Under the Background of Carbon Neutrality[J]. Modern Radar, 2021, 43(7): 98-99.
- [3] 彭 寿. 推动光伏建筑一体化引导产业向绿而行[J]. 施工企业管理, 2022(4): 46.
PENG Shou. Promote the Integration of Photovoltaic Buildings to Guide the Industry to the Green[J]. Construction Enterprise Management, 2022(4): 46.
- [4] 吴高翔, 王 凯. 光伏建筑一体化存在的问题及解决方法分析[J]. 智能城市, 2021, 7(7): 39-40.
WU Gaoxiang, WANG Kai. Analysis of the Existing Problems and Solutions of Photovoltaic Building Integration[J]. Intelligent City, 2021, 7(7): 39-40.
- [5] 海 涛, 周楠皓, 周明雨, 等. 建筑信息化模型技术在光伏建筑一体化中的研究与应用[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(6): 2191-2196.
HAI Tao, ZHOU Nanhao, ZHOU Mingyu, et al. Research and Application in Building Integrated Photovoltaic Based on Building Information Modeling[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43(6): 2191-2196.
- [6] 尹 正, 施会玲. 基于ISM的绿色建筑发展影响因素层次关系研究[J]. 安徽建筑大学学报, 2022, 30(2): 83-89.
YIN Zheng, SHI Huiling. Research on Hierarchical Relationship of Influencing Factors of Green Building Development Based on ISM[J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2022, 30(2): 83-89.
- [7] 李丽红, 白丰源, 毛蓓蓓, 等. 基于ISM-MICMAC的绿色建筑高质量发展研究: 以沈阳市为例[J]. 建筑经济, 2022, 43(3): 98-104.
LI Lihong, BAI Fengyuan, MAO Beibei, et al. Research on the High-Quality Development of Green Building Based on ISM-MICMAC: A Case Study of Shenyang[J]. Construction Economy, 2022, 43(3): 98-104.
- [8] 韩立红, 孙建伟. 基于ISM模型的绿色建筑产业化影响因素分析[J]. 工程经济, 2016, 26(12): 73-76.
HAN Lihong, SUN Jianwei. Analysis of Influencing Factors About Green Building Industrialization Based on ISM Model[J]. Engineering Economy, 2016, 26(12): 73-76.
- [9] 陆秋琴, 竹嘉欣, 黄光球. 建筑企业绿色化发展影响因素研究[J/OL]. 经营与管理: 1-19. [2022-07-10]. <https://doi.org/10.16517/j.cnki.cn12-1034/f.20220614.001>.
- LU Qiuqin, ZHU Jiaxin, HUANG Guangqiu. Study on the Impact Factors of Green Development of Construction Enterprises[J/OL]. Management and Administration: 1-19. [2022-07-10]. <https://doi.org/10.16517/j.cnki.cn12-1034/f.20220614.001>.
- [10] 赖 力, 张婧欣, 孙 煜, 等. 双碳背景下我国新能源产业竞争力关键点和创新发展研究[J]. 现代管理科学, 2022(3): 51-57.
LAI Li, ZHANG Jingxin, SUN Yu, et al. Research on Key Points and Innovation Development of China's New Energy Industry Under the Background of Dual-Carbon[J]. Modern Management Science, 2022(3): 51-57.
- [11] 侯延香, 李 敏, 李永福. 基于ISM模型的装配式装修发展影响因素分析[J]. 建筑经济, 2021, 42(11): 78-84.
HOU Yanxiang, LI Min, LI Yongfu. Analysis on Influencing Factors of the Prefabricated Decoration Development Based on ISM Model[J]. Construction Economy, 2021, 42(11): 78-84.
- [12] 罗 祥, 黄喜兵. 基于ISM的装配式建筑成本控制研究[J]. 建筑经济, 2021, 42(11): 73-77.
LUO Xiang, HUANG Xibing. Research on Cost Control of Prefabricated Building Based on Interpretative Structural Modeling Method[J]. Construction Economy, 2021, 42(11): 73-77.
- [13] 陈为公, 王路坤, 闫盛华, 等. 邻避项目中公众参与的影响因素及其作用机制: 基于ISM-MICMAC方法[J]. 沈阳大学学报(社会科学版), 2022, 24(2): 145-155.
CHEN Weigong, WANG Lukun, YAN Shenghua, et al. Influencing Factors and Action Mechanism of Public Participation in NIMBY Projects: Based on ISM-MICMAC Method[J]. Journal of Shenyang University (Social Science), 2022, 24(2): 145-155.
- [14] 郭 梨, 王筱梅, 杨 震. 基于ISM-AHP的建筑施工企业安全投入结构优化研究[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(2): 22-26.
GUO Li, WANG Xiaomei, YANG Zhen. Research on Safety Input Structure Optimization of Construction Enterprises Based on ISM-AHP[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2022, 48(2): 22-26.
- [15] 郭 婷, 吕 然, 丁晓强. 基于ISM和AHP分析的高层建筑施工风险影响因素研究[J]. 建筑安全, 2020, 35(5): 51-54.
GUO Ting, LÜ Ran, DING Xiaoqiang. Study on the Construction Risk Influencing Factors of High-Rise Buildings Based on ISM and AHP Analysis[J]. Construction Safety, 2020, 35(5): 51-54.

(责任编辑: 廖友媛)